

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problems Mailbox.**



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 199 55 587.7

**Anmeldetag:** 18. November 1999

**Anmelder/Inhaber:** Siemens AG, München/DE

**Bezeichnung:** Simulation mechatronischer Systeme

**IPC:** G 05 B 19/4099

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der  
ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 24. November 2000  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag



Ebert

# Simulation mechatronischer Systeme

## 1. Problemstellung

Die Siemens AG gehört auf dem Gebiet der Numerischen Steuerungen zu den führenden Unternehmen. Das Produkt SINUMERIK 840D ist weltweit verbreitet und dient zur Steuerung von Werkzeugmaschinen, Industrierobotern und Sondermaschinen. In diesem Bericht soll speziell auf die Steuerung von Fräsmaschinen eingegangen werden.

Die Prozesskette Fräsbearbeitung setzt sich heutzutage üblicherweise aus den Gliedern

- ☐ Erzeugung eines NC-Teileprogramms
- ☐ spanabhebende Fertigung des Werkstücks

zusammen. Dabei wird das NC-Teileprogramm im einfachsten Fall direkt von einem Programmierer kodiert oder das Werkstück zunächst mit Hilfe eines CAD-Systems modelliert und dann in ein äquivalentes NC-Teileprogramm umgewandelt. Der eigentliche Fertigungsschritt wird neben den Maschinendaten im wesentlichen durch den numerischen Kern (NC-Kern), den Antrieb und die Mechanik des Systems bestimmt. Der Daten- und Informationsfluss ist jedoch nach außen hin nicht sichtbar, das System hat den Charakter einer black box. Dies führt beispielsweise zu Problemen, wenn die Oberflächenqualität des gefertigten Werkstücks nicht den Erwartungen des Kunden entspricht.

Die Zuordnung der Ursachen für die mangelnde Qualität ist einerseits aufgrund der großen Datenmenge nicht ganz einfach. So sind etwa NC-Teileprogramme mit mehreren hunderttausend Sätzen keine Seltenheit, wobei davon oft nur etwa ein Promille für die Oberflächenunregelmäßigkeiten verantwortlich ist. Darüberhinaus sieht man sich mit den Problemen

- ☐ Auswahl der optimalen Technologieparameter (Spindeldrehzahl, Vorschub)
- ☐ Einstellung der optimalen Antriebs-Maschinendaten
- ☐ Abstimmung der NC-Komponenten (Kompressor, Look Ahead, MC, Interpolation)
- ☐ mechanische Probleme der Maschine
- ☐ unzulängliche NC-Programme

konfrontiert.

Die Lösung dieser Problematik liegt in der Simulation des vorliegenden mechatronischen Systems. Auf diese Weise kann das Entstehen des (virtuellen) Werkstücks wie mit einem Monitor schrittweise verfolgt und dokumentiert werden. Weiter ist es möglich, gezielt die Auswirkungen einzelner Systemkomponenten auf die Qualität des Werkstücks analysieren zu können. Diese können während der Simulation ausgeblendet und auf diese Art und Weise idealisiert werden. Weitere Vorteile dieses Vorgehens ergeben sich aus der Steigerung der Softwarequalität durch

den Vergleich einzelner Softwarestände (Testautomation). Darüberhinaus steigert sich der Kundennutzen dahingehend, dass dieser in der Lage ist, die Qualität des zu fertigenden Werkstücks bereits im Voraus, d.h. ohne eine tatsächliche Fertigung, in Abhängigkeit der jeweiligen Steuerungs-, Antriebs- und Mechanikdaten bestimmen zu können.

## 2. Zielsetzung

Das Ziel besteht also in der Entwicklung eines Tools, mit dessen Hilfe es möglich wird, den gesamten Fräsvorgang, beginnend mit dem NC-Teileprogramm bis hin zum fertigen (virtuellen) Werkstück zu simulieren und die Ergebnisse einzelner Zwischenstationen zu visualisieren.

Wichtig für das tiefergehende Verständnis des zu simulierenden mechatronischen Systems ist der zugrundeliegende Information- und Datenfluß. Wie in *Fig. 1* dargestellt, gliedert sich die Steuerung in zwei Aufgabenbereiche, die Satzaufbereitung und die Satzausführung.

Während der nichtzyklischen Satzaufbereitung werden die einzelnen Sätze jeweils zunächst dekodiert und der entstehende Zwischenkode interpretativ dem Vorlauf zugeführt. Dieser besteht im wesentlichen aus den Komponenten Kompressor, welcher aus den Linearsätzen des NC-Teileprogramms Polynome berechnet, und dem Look Ahead, welcher in Abhängigkeit von den jeweiligen Maschinendaten die Einhaltung der Bewegungsgrenzwerte garantiert. Der nachfolgende Hauptlauf besteht hauptsächlich aus der Bewegungsführung (engl: motion control, MC), welche Lage-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsinformation bezüglich des Bahnparameters berechnet. Diese Information wird dann mit Hilfe der Interpolation auf die einzelnen Achsen aufgeteilt. Vorlauf und Hauptlauf bilden den sogenannten NC-Kern, die numerische Komponente des mechatronischen Systems.

Die im NC-Kern berechneten Sollwerte für Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung werden anschliessend dem Antrieb übergeben. Dieser besitzt die Aufgabe, unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Mechanik, die gewünschten Lage-, Drehzahl- und Stromwerte einzuprägen. Er realisiert die regelungstechnische Komponente des Gesamtsystems.

Zu einer differenzierten Beurteilung der Fräsgenauigkeit muss zunächst die Möglichkeit zur Visualisierung gegeben sein. Prinzipiell werden durch ASCII-Dateien wie beispielsweise das NC-Teileprogramm oder den Kompressor-Ausgang Zwischenergebnisse des zu fertigenden Werkstückes bereits dargestellt. Bei dieser Art der Darstellung kann jedoch nicht von einer genügenden Visualisierung gesprochen werden. Auch Punkt- oder Liniendarstellungen sind oftmals nicht hinreichend zur genaueren Untersuchung der Ergebnisse. Man wird deshalb eine Visualisierung fordern, welche zumindest den Ausprägungen

- ☐ Flächenmodell des virtuellen Werkstücks
- ☐ interpolierende 3D-Punktedaten
- ☐ Zoom, Rotation in beliebig tiefer Zoomstufe,
- ☐ unterschiedliche Beleuchtungsmodelle (Lichtquellen, Farben)
- ☐ 4. Dimension (Geschw., Diff. zum Lagesollwert bzw. zweier NC-Teileprog.)
- ☐ Bildaufbau bereits während der NC-Teileprogrammverarbeitung
- ☐ Stapelverarbeitungsbetrieb

genügt. Es muss daher insgesamt möglich sein, ein realistisches Oberflächenbild des virtuellen Werkstücks weitgehend automatisch zu erzeugen. Präziser formuliert ergibt sich das folgende Visualisierungsproblem: Unter Erhaltung der Fräsbahn und der Werkstückkontur ist eine aus Polyedern zusammengesetzte Fläche zu bestimmen, welche die gegebene Punktemenge linear interpoliert. Besteht das virtuelle Werkstück etwa aufgrund von Leerwegen aus mehreren Teilflächen, so sind diese zunächst getrennt voneinander zu verfläichen und die Einzelflächen anschliessend zu einer Gesamtfläche an ihren Rändern zu verschmelzen.

Als weiteres Teilziel schließt sich die Simulation des NC-Kerns an. Hierbei können zunächst einzelne Komponenten, wie etwa der Kompressor oder der Interpolator getrennt und anschliessend deren Zusammenspiel betrachtet werden. Durch die Änderung von Parametern erhält man insbesondere eine tiefere Einsicht in die Auswirkungen der betrachteten Komponenten auf die Oberflächenbeschaffenheit des zu fertigenden Werkstücks. Dies führt letztendlich im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungspotentials zu einer nicht zu unterschätzenden Unterstützung der Anwender.

Als weitere Herausforderung stellt sich die Simulation der Antriebe unter Berücksichtigung der des Systems zugrundeliegenden Mechanik.

Als erster Schritt muss die Mechanik modelliert werden. Hierbei kann zwischen verschiedenen Modellen wie beispielsweise starrer Mechanik bis hin zu elastischen Modellen unterschieden werden. Nachfolgend muss die das gewählte Mechanikmodell beschreibende Differentialgleichung gelöst oder zumindest dessen Übertragungsfunktion berechnet werden. Schließlich evaluiert der Vergleich mit durchgeführten Messungen die Güte des gewählten Mechanikmodells.

Das Mechanikmodell beschreibt die Physik des Systems und damit die Regelstrecke im Antriebsregelkreis. Die Simulation des Antriebes bedeutet daher den Entwurf und die Einstellung des Reglers, wobei auch hier unterschiedlichste Varianten zur Auswahl stehen. Die optimale Lösung dieser Aufgabe ist entscheidend für die Qualität der Fertigung.

Letztlich muss die jeweils vorliegende Fräsergeometrie im Gegensatz zum idealisierenden Punktfräser modelliert und algorithmisch mitberücksichtigt werden.

4

Aufgabe der Erfindung ist es daher eine Zeitersparnis an der Maschine durch einen virtuellen Fertigungsprozeß zu erreichen, wobei eine realisierbare Genauigkeit vorhersagbar sein soll.

5

Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe durch die Merkmale des Anspruchs erreicht.

Patentanspruch

1. Verfahren zur Simulation des Entstehungsprozesses von CNC-gefertigten Werkstücken, g e k e n n z e i c h n e t
- 5 durch eine Simulation mit virtuellen Werkstücken bei dreidimensionaler Oberflächendarstellung, auf deren Basis eine in der Realität erzielbare Qualität vorhersagbar ist.

## Zusammenfassung

### Simulation mechatronischer Systeme

- 5 Verfahren zur Simulation des Entstehungsprozesses von CNC-gefertigten Werkstücken, wobei eine Simulation mit virtuellen Werkstücken bei dreidimensionaler Oberflächendarstellung, auf deren Basis eine in der Realität erzielbare Qualität vorher-sagbar ist.

10

FIG 1



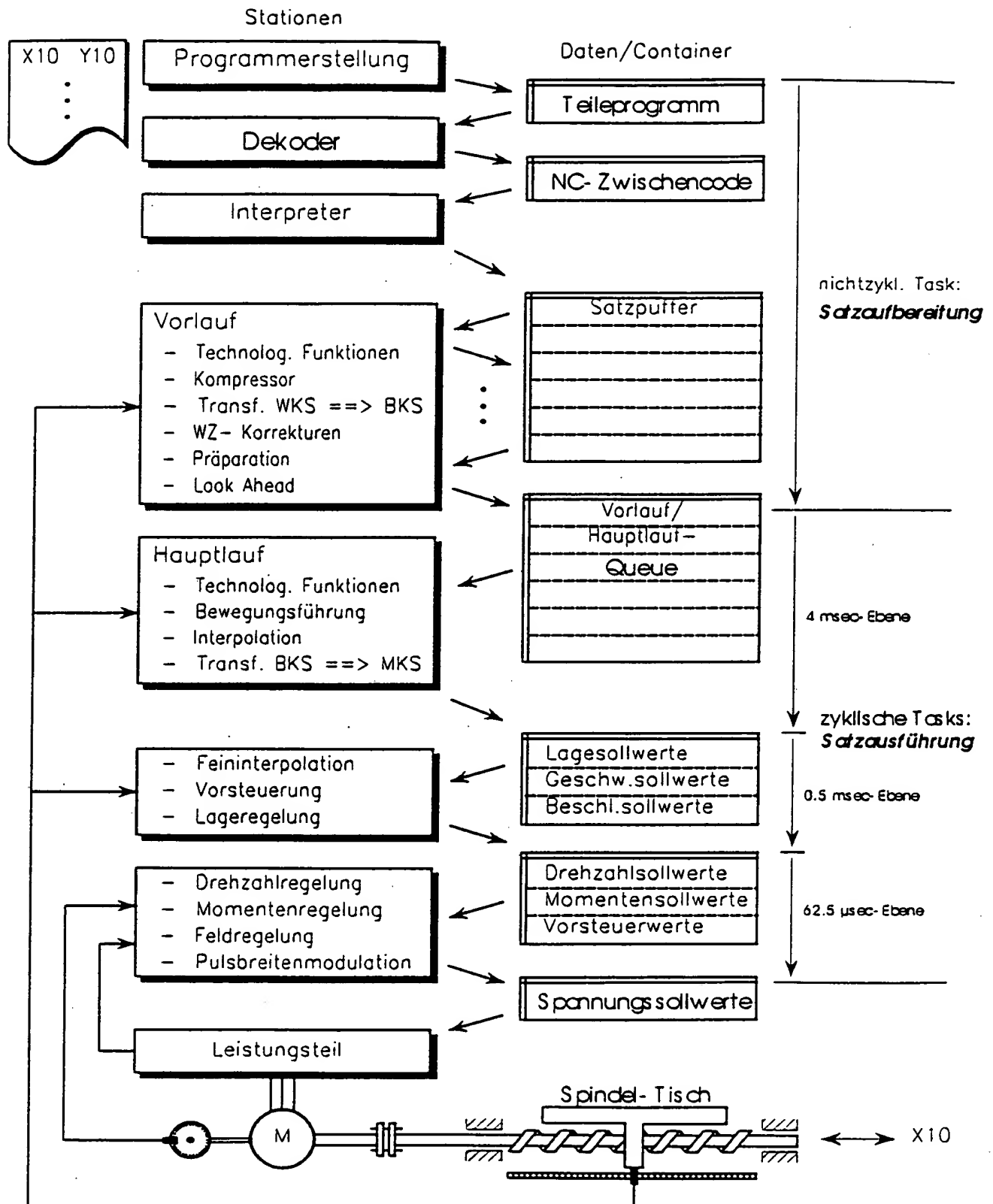
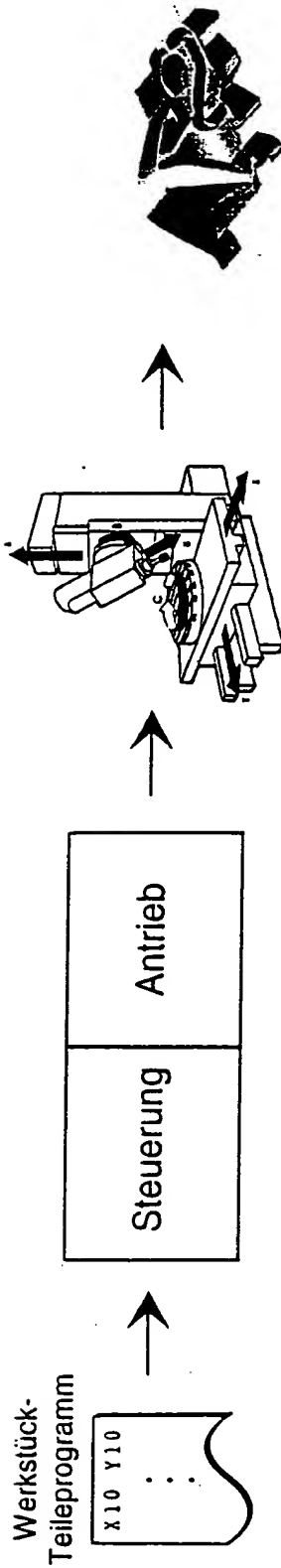


Fig. 1



### Ausgangssituation:

Die Oberflächenqualität eines gefertigten Werkstücks entspricht nicht den Erwartungen des Kunden

- Die Zuordnung der Ursache(n) für die schlechte Qualität ist

- aufgrund der großen Datenmenge des Teileprogramms:
  - Testwerkstück hat 3Mbyte mit ca. 130000 Sätzen,
  - wovon nur 1 Promille Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche aufweist
- und aufgrund der vielen möglichen Ursachen:
  - falsche Technologieparameter (Spindeldrehzahl, Vorschub, Fräserzustand ...)
  - falsch eingestellte Antriebe oder Maschinendaten
  - Mängel der NC-Software (Kompressor, Look Ahead, Motion Control, Interpolation ...)
  - mechanische Probleme an der Maschine
  - unzulängliche NC-Programme

für den Entwickler nicht ganz einfach.

Fig. 2

### *Ausgangssituation (2):*

- Der Nachweis der Auswirkungen von Softwareänderungen auf die Werkstückqualität kann nur am realen Werkstück
  - entweder durch Vermessen
  - oder durch „Hinsehen“ erfolgen (ein Blick genügt, Grund dafür ist die enorme Rechenleistung des menschlichen Gehirns bei der Verarbeitung visueller Eindrücke).

Die Ursachenforschung und Behebung erfordert daher einen enormen Zeit- und damit Kostenaufwand.

### *Idee:*

*Wenn man in der Lage wäre, ein virtuelles Werkstück zu erzeugen, könnte man für Testzwecke auf den langwierigen Fertigungsprozeß an der Maschine verzichten, eine Menge Zeit sparen und flexibler sein.*

Fig. 3

#### *Zielsetzung:*

- Ziel ist die Entwicklung eines Tools, mit dem virtuelle Werkstücke erzeugt werden können.  
Nach Möglichkeit sollen dabei auch Zwischenschritte darstellbar sein, um gezielt die Auswirkungen einzelner Komponenten (Teileprogramm, NC, Antrieb, Mechanik) auf die Oberflächenqualität analysieren zu können.
- Insbesondere können durch Weglassen einzelne Komponenten auch idealisiert werden.  
Das Entstehen eines Werkstücks soll wie mit einem Monitor schrittweise verfolgt bzw. getraced werden können.

#### *Weitere Vorteile:*

Steigerung der SW-Qualität durch Vergleich einzelner Traces von Softwareständen (Testautomation).  
Steigerung des Kundennutzen durch Vorab-Ermittlung der möglichen Qualität zu fertigender Werkstücke bei unterschiedlichen Steuerungs-, Antriebs- und Mechanikdaten.

Fig. 4

### Vorgehen (1):

#### Schritt 1: Visualisierung in Form eines 3D-Flächenmodells

- Werkstück-Teilprogramm
- Kompressor-Ausgang
- Interpolator-Ausgang
- Fipo-Ausgang
- beliebige Zwischenschritte möglich

Angestrebt wird jeweils eine Darstellung, welche die Ausprägungen

- Geometrisches Flächenmodell,
- interpolierende 3D-Punktedaten,
- Rotation und Zoom in beliebiger Tiefe,
- unterschiedliche Beleuchtungsmodelle (Lichtquellen, Farben),
- 4. Dimension zur Darstellung von
  - Geschwindigkeiten, Beschleunigungen auf der Bahn
  - Differenzen einzelner Traces (z.B. NC-Teilprogramm  $\leftrightarrow$  Ipo-Output)
- Bildaufbau bereits während der NC-Teilprogrammverarbeitung und
- Stapelverarbeitungsbetrieb

unterstützt. Zunächst kann dabei von einem nulldimensionalen idealen Fräser ausgegangen werden, später ist die Fräsergeometrie exakt zu modellieren und algorithmisch mitzuberechnen.

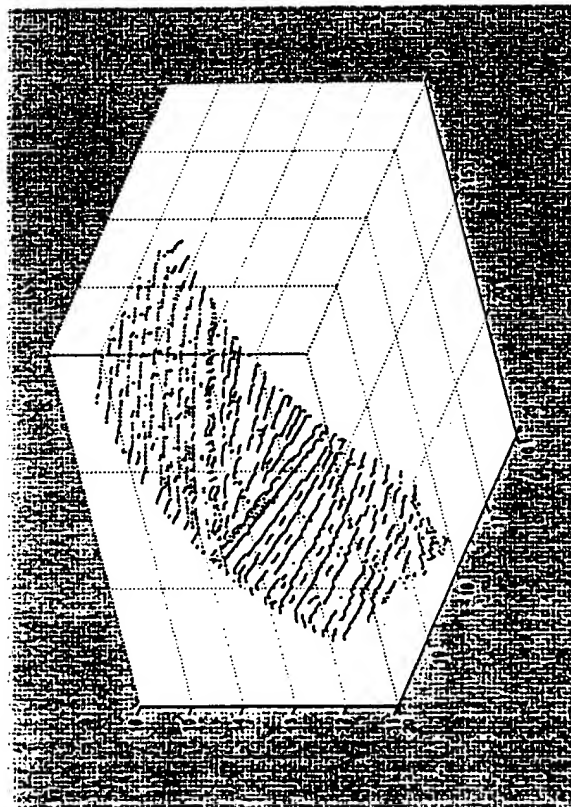
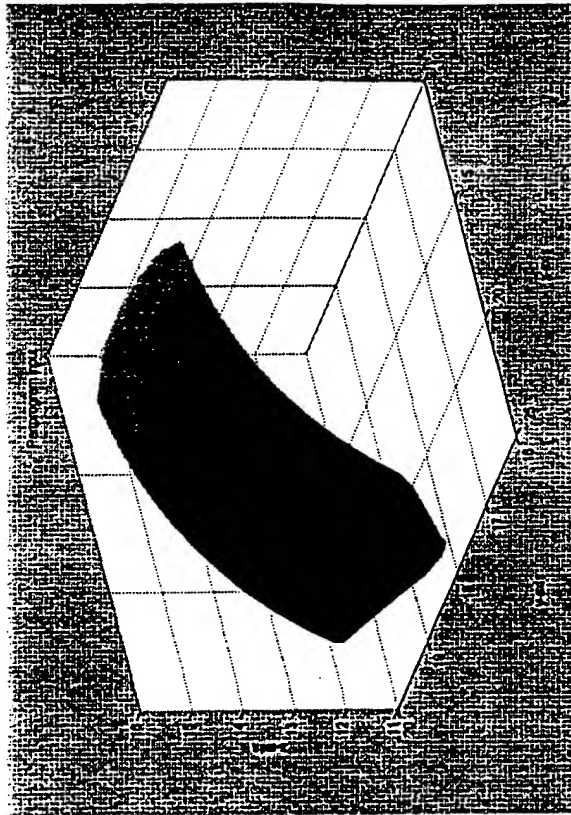
Fig. 5

*Vorgehen (2):*

*Schritt 2:* Kopplung der NC-Kern-Simulation (Workstation) mit der Antriebssimulation unter Matlab/Simulink, ideale Mechanik

*Schritt 3:* Hinzunahme komplexer Mechanikmodelle der Werkzeugmaschine

Fig. 6

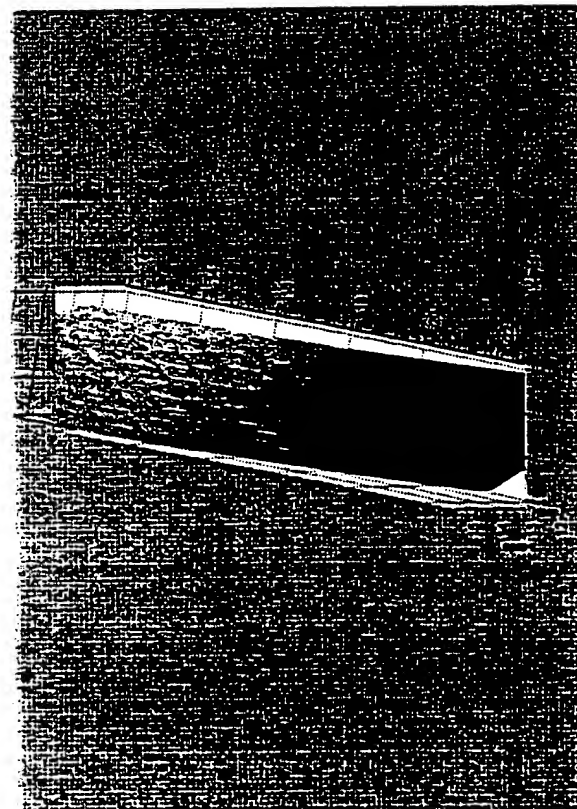
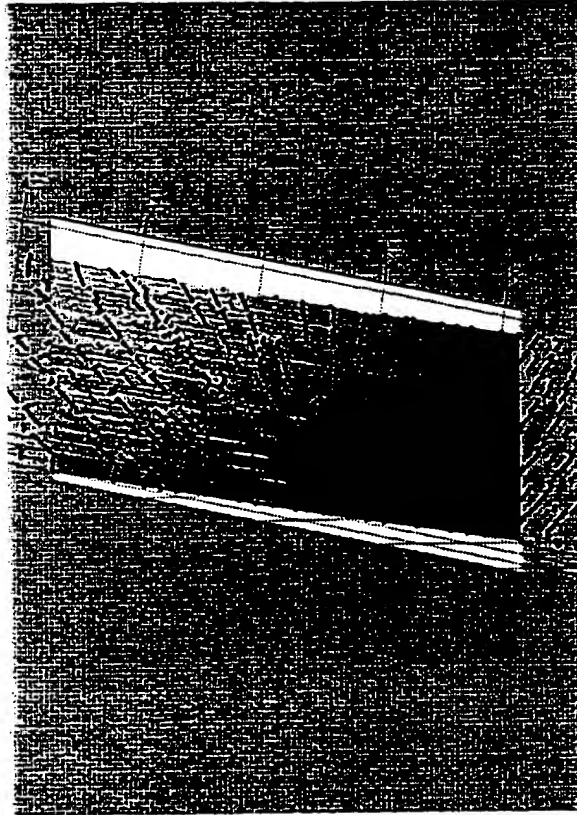


Karosserieausschnitt

Links: Teileprogrammdaten (Linearsätze)

Rechts: Virtuelles Werkstück (Teileprogramm)

Fig. 7



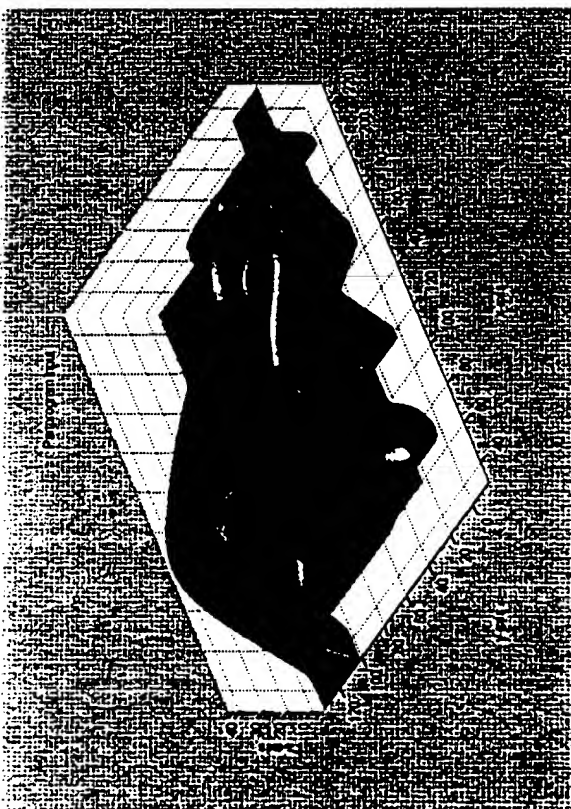
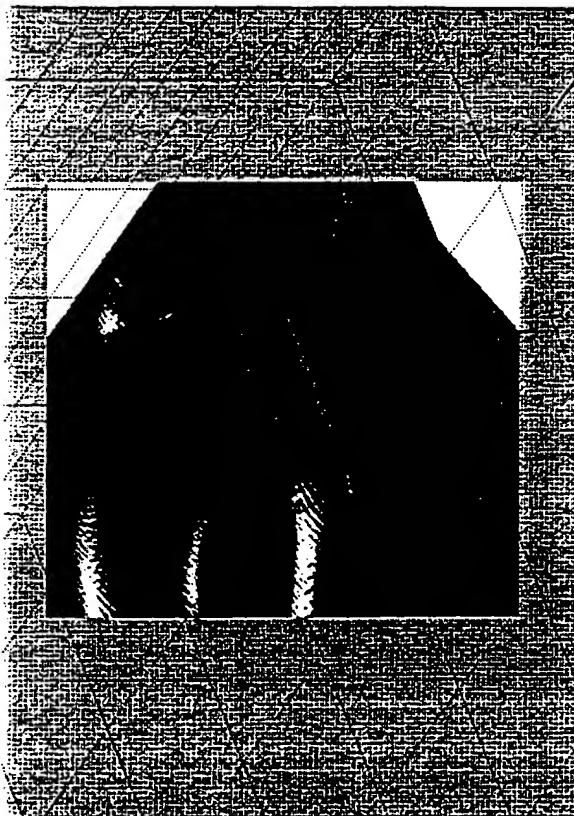
Karosserieausschnitt

Links: Virtuelles Werkstück (Teileprogramm)

Rechts: Teileprogrammdaten und Virtuelles Werkstück

Fig. 8



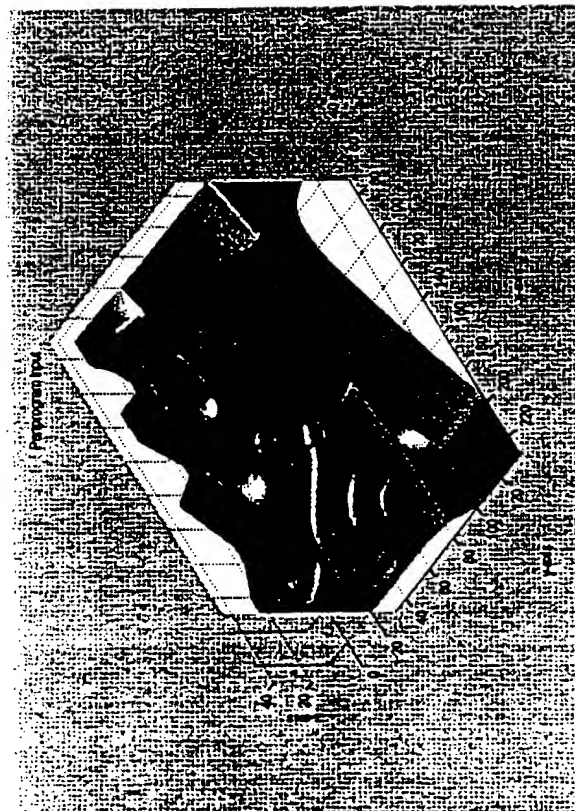
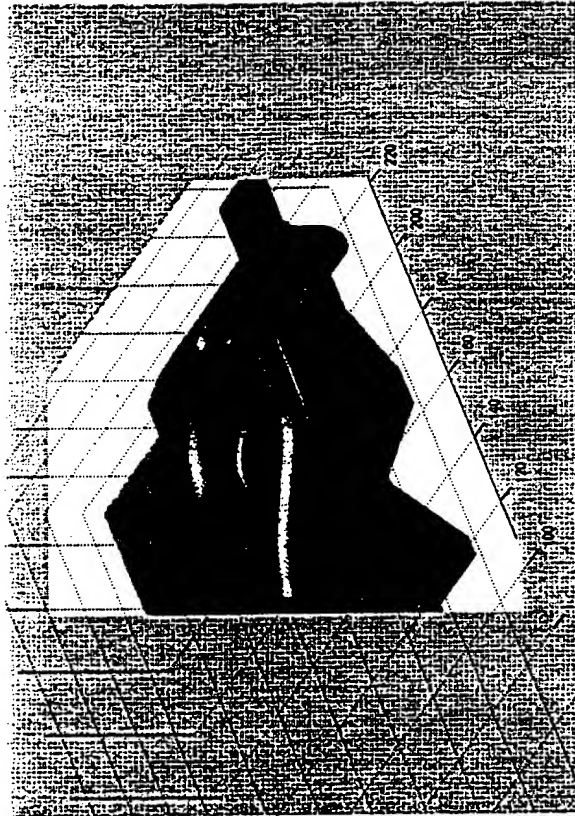


Testwerkstück.

Links: Gesamtansicht Virtuelles Werkstück (Teileprogramm)

Rechts: Zoom

Fig. 9



Testwerkstück.

Links: Rotierte Gesamtansicht Virtuelles Werkstück (Teileprogramm)  
Rechts: Zoom

Fig. 10